

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.05.022

杨浩宇, 马岚, 陈仕媛. 北方土石山区冻融与水力复合作用对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 92-101.

YANG Haoyu, MA Lan, CHEN Shiyuan. Effects of freeze-thaw and hydraulic compound action on soil erosion in northern rocky mountainous area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 92-101.

北方土石山区冻融与水力复合作用对土壤侵蚀的影响

杨浩宇¹, 马岚^{1,2,3}, 陈仕媛¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学国家林业和草原局水土保持重点实验室, 北京 100083; 3. 北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083)

摘要: [目的] 揭示冻融与水力作用在不同条件下对北方土石山区土壤侵蚀的影响。[方法] 以北京市鹫峰地区土壤为研究对象, 采用室内径流冲刷及冻融设备进行模拟试验, 探讨在冻融与水力作用下冻融循环次数、坡度、流量、土壤初始含水率和冻融温差这 5 个影响因素对土壤产沙量与抗冲性的影响。[结果] (1) 土壤抗冲系数对各因素敏感程度大小为坡度>流量>冻融温差>冻融循环次数>初始含水率, 其中坡度与流量对其具有显著影响 ($p<0.05$); 土壤产沙量对各因素敏感程度大小为流量>坡度>冻融温差>土壤含水率>冻融循环次数, 其中流量对其具有极显著影响 ($p<0.01$), 坡度与冻融温差对土壤产沙量具有显著影响 ($p<0.05$)。 (2) 冻融循环次数、坡度及流量的大小与土壤抗冲系数呈负相关, 冻融温差大小却与其呈正相关, 而抗冲系数随土壤初始含水率的增加呈先减小后增大的趋势。 (3) 土壤产沙量随流量、坡度和冻融循环次数的增大而增大, 随着冻融温差整体温度的增大而减小; 随着土壤含水率的增加, 土壤产沙量呈先增大后减小的趋势; 在冻融循环次数为 7, 10 次时, 土壤产沙率在径流冲刷中期 (3~6 min) 有峰值出现 (96.7~99.7 g/min), 随后趋于平稳。[结论] 北方土石山区土壤在冻融与水力复合作用下受多种因素影响密切, 研究结果有助对该地区复合侵蚀防治及合理配置水土保持措施提供理论支持。

关键词: 冻融作用; 水力作用; 侵蚀规律; 抗冲性; 产沙量; 产沙率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0092-10

Effects of Freeze-thaw and Hydraulic Compound Action on Soil Erosion in Northern Rocky Mountainous Area

YANG Haoyu¹, MA Lan^{1,2,3}, CHEN Shiyuan¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Jixian Forest Ecosystem National Observation and Research Station, CNERN, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aims to elucidate the impact of freeze-thaw cycles and hydraulic action on soil erosion in the northern rocky mountain regions under varying conditions. [Methods] Utilizing soil samples from the Jiufeng area in Beijing, we conducted simulation tests using indoor runoff scouring and freeze-thaw equipment. We examined the effects of five key factors—freeze-thaw cycle frequency, slope gradient, flow rate, initial soil moisture content, and freeze-thaw temperature differential—on soil sediment yield and anti-scourability. [Results] (1) The sensitivity of the soil's anti-scourability coefficient to these factors ranks as follows: slope>flow rate>freeze-thaw temperature difference>freeze-thaw cycles>initial moisture content. Notably, slope and flow rate significantly influence the coefficient ($p<0.05$). For soil sediment yield, the sensitivity ranking is: flow rate>slope>freeze-thaw temperature difference>soil moisture content>freeze-thaw cycles, with flow rate exhibiting a very significant impact ($p<0.01$), and

收稿日期: 2024-03-29

修回日期: 2024-06-06

录用日期: 2024-06-24

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-03

资助项目: 雄安新区科技创新专项“雄安新区流域生态修复与生物多样性保护技术与示范”(2023XAGG0066)

第一作者: 杨浩宇 (1999—), 男, 硕士, 主要从事冻融侵蚀研究。E-mail: 1095404938@qq.com

通信作者: 马岚 (1981—), 女, 博士后, 教授, 主要从事森林水文、坡面水文等研究。E-mail: mlpcz@sina.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

both slope and freeze-thaw temperature difference showing significant effects ($p < 0.05$). (2) The number of freeze-thaw cycles, slope, and flow rate negatively correlate with the soil's anti-scour coefficient, whereas the temperature difference during freeze-thaw cycles positively correlates with it. The anti-scour coefficient initially decreases and then increases with rising initial soil moisture content. (3) Soil sediment yield increases with higher discharge rates, steeper slopes, and more frequent freeze-thaw cycles, but decreases with an increase in the overall temperature of the freeze-thaw differential. As soil moisture content rises, sediment yield initially increases and then decreases. When the number of freeze-thaw cycles reaches 7 or 10, sediment yield peaks (96.7~99.7 g/min) during the middle phase of runoff scouring (3~6 min) and then stabilizes. [Conclusion] Soil in the northern rocky mountain areas is significantly impacted by various factors under the combined effects of freeze-thaw and hydraulic pressures. The findings of this study provide valuable theoretical support for the prevention and management of combined erosion and for the strategic allocation of soil and water conservation measures in these regions.

Keywords: freeze-thaw effect; hydraulic effect; erosion law; erosion resistance; sediment yield; sediment yield rate

Received: 2024-03-29

Revised: 2024-06-06

Accepted: 2024-06-24

Online(www.cnki.net): 2024-09-03

作为我国3种最重要的土壤侵蚀类型之一,冻融侵蚀对于我国水土流失的影响程度已愈发明显^[1]。据第2次全国土壤侵蚀遥感调查资料^[2]统计,我国可发生冻融侵蚀的面积超过126.98万km²,占全国国土总面积的13.4%。在冻融侵蚀过程中,对土壤影响最显著的是冻融作用,其通过对土壤孔隙中的水分进行反复的冻胀与消融,增大土壤孔隙度,改变土壤颗粒的排列顺序,从而使土壤物理性状发生变化^[3],为其他形式侵蚀的发生提供一定条件。

冻融作用经常与水力、重力等作用复合起来造成水土流失,如融雪径流侵蚀、冻融风蚀和冻融泥流等^[4-6]。融水是导致冻融复合侵蚀的主要驱动力之一,在一部分经常发生冻融侵蚀的地区,春季的融水径流侵蚀量占全年水土流失量的1/2以上^[7]。春季解冻期的土壤侵蚀大部分来自复合营力作用,由于气温的回升,再加上土体经过反复冻融后孔隙度增大,容重减小,抗蚀性降低,很容易在冻融与水力作用下发生较大程度的土壤侵蚀^[8]。目前,关于冻融复合侵蚀的研究主要集中在高海拔寒冷地区,由于高寒区昼夜温差较大,对土壤产生较强的冻融作用,而冰川与积雪是导致高寒地区土壤流失的主要水力条件^[9],其融化后的量一般占高寒区总径流的66%^[10],从而使得该地区的土壤侵蚀经常受到冻融与水力作用影响。有研究^[11-13]发现,对于影响冻融与水力作用下土壤侵蚀的主要因素有冻融循环次数、冻融温差和土壤初始含水量等,这些因素都对冻融后土壤的物理性质产生不同程度的改变。

北方土石山区是我国主要水土流失类型区之一,

该区主要发生水力、风力等多种侵蚀类型^[14],同时在北方土石山区的高海拔位置存在冻融与水力复合作用的侵蚀现象,如安徽的九华山、北京的海坨山等^[15],其冬季因常年积雪,春季后融雪水产生的径流对表层经冻融后的土壤造成严重侵蚀^[16]。目前该区大量已有研究^[17-19]主要关注水力侵蚀对其的影响,而对该地区存在的冻融与水力复合侵蚀研究相对较少^[15-16],且对于其侵蚀过程的量化研究较为片面,使得有关这方面的概念与信息不够完善,阻碍我国对于该区多营力复合作用下土壤侵蚀规律的认识。

为揭示冻融与水力复合作用对北方土石山区土壤侵蚀的影响,本文选择该区的典型土壤作为研究对象,利用径流冲刷及冻融设备,模拟坡面在水力和冻融复合作用下的土壤侵蚀过程。通过正交试验和控制变量法,从土壤产沙和土壤抗冲性两大角度,分析不同因素对于冻融与水力复合侵蚀的影响程度及作用机理,研究结果将为该地区水力和冻融复合侵蚀防治及合理配置水土保持措施提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

土样取自北京市鹫峰地区(116°05'E,40°03'N),该区面积为832.04 hm²,最高海拔1100 m,平均高度450 m。该地区冬季寒冷干燥,降雪量大,且昼夜温差明显^[20],最低气温可达-19.6℃。该地区土壤进入冻结期的时间一般为11月中旬,3月初气温转正,冰雪开始融化,产生的径流对该地区经冻融后的土壤造成较为严重的侵蚀。

1.2 试验土样与试验设计

在鹫峰海拔500 m位置处进行试验取土。具体

取土位置选择解冻期间易受到融雪水冲刷的坡面下部,该位置处的土壤类型为褐土,属于北方土石山区的典型土壤类型^[21]。土壤体积质量为 1.39 g/cm³,土层深厚,黏粒较多,过筛后的土样的粒径分析结果为:黏粒(<0.002 μm)质量分数为(11.46±1.24)%,粉粒(0.002~0.05 μm)质量分数为(30.86±1.74)%,砂粒(0.05~2 μm)质量分数为(57.68±1.97)%。

试验采取控制变量与正交试验法,其中正交试验中选取 5 个影响因子,每个因子采用 5 个水平,选用不含交互作用的 L₂₅(5⁶)正交表进行试验(表 1),每组试验进行 3 次重复。

表 1 正交试验

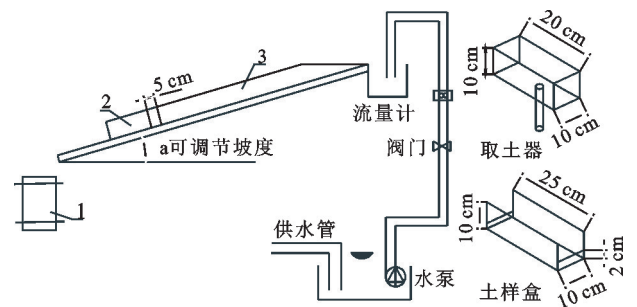
Table 1 Orthogonal experimental					
试验号	A—冻融 循环/次	B—坡度/ (°)	C—径流量/ (L·min ⁻¹)	D—初始 含水率/%	E—冻融 温差/℃
1	1	3	1.0	5	-1~10
2	1	6	1.5	10	-7~8
3	1	9	2.0	15	-13~6
4	1	12	2.5	20	-19~4
5	1	15	3.0	25	-25~2
6	3	3	1.5	15	-19~4
7	3	6	2.0	20	-25~2
8	3	9	2.5	25	-1~10
9	3	12	3.0	5	-7~8
10	3	15	1.0	10	-13~6
11	5	3	2.0	15	-7~8
12	5	6	2.5	5	-13~6
13	5	9	3.0	10	-19~4
14	5	12	1.0	15	-25~2
15	5	15	1.5	20	-1~10
16	7	3	2.5	10	-25~2
17	7	6	3.0	15	-1~10
18	7	9	1.0	25	-7~8
19	7	12	1.5	30	-13~6
20	7	15	2.0	5	-19~4
21	10	3	3.0	25	-13~6
22	10	6	1.0	30	-19~4
23	10	9	1.5	5	-25~2
24	10	12	2.0	10	-1~10
25	10	15	2.5	15	-7~8

将供试土壤剔除植物根系和杂物并自然风干,使用 2 mm 过筛网进行过筛后放入长、宽、高为 30 cm×20 cm×10 cm 的保温盒中,采用分层填土,每盒分 5 层,2 cm 为 1 层,使用砂纸将每层土壤表面打磨粗糙以防止土层间发生分层。在保温盒的四周及底部贴上隔热棉,以最大程度模拟在自然条件下,土壤从上至下的冻融过程^[22]。根据融雪期测得的取土区表层土壤含水率为 15%,分别设置 5 种不同含水率(5%,10%,15%,20%,25%)的土样,配置过程中使

用喷壶将水均匀喷洒在土壤上,配置完后在保温盒的上方覆盖 1 层保鲜膜,防止水分蒸发,并在室温内静置 12 h,使水分在土壤中分布均匀。后将土样放入冰箱中,根据北方土石山区在冻融期的昼夜温差变化,设置不同冻融温差并进行冻融循环(-1~10,-7~8,-13~6,-19~4,-25~2℃),循环次数分别为 1,3,5,7,10 次,冻制 12 h,解冻时间 12 h。待其解冻后,使用取样器,将土样从保温盒中取出并放入土样盒。其中,取样器长、宽、高为 20 cm×10 cm×10 cm,上方设有把手,内壁经过打薄方便取土。

径流冲刷试验设备见图 1。土样盒长、宽、高为 25 cm×10 cm×10 cm,其中有 5 cm 部分嵌入泡沫板中(图 1),前后开口处底部设有 2 cm 的挡板,一方面方便其与泡沫板固定;另一方面,防止试验土样在冲刷过程中发生位移。其中,泡沫板用来垫高水位,使得水流从土样盒上方流经。其中径流冲刷设备的整体设计参考相关研究^[23-25]的试验。

冲刷试验开始前,根据该区的坡度范围设置不同坡度(3°,6°,9°,12°,15°),并根据其在冻融期的积雪厚度,设置不同放水流量(1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 L/min)。将冻制好的冰袋放入蓄水槽中,使槽内水温接近 0℃,以便模拟融水温度。冲刷时间控制在供试土样因水流冲刷而被垂直穿透前停止(大约 10 min)。冲刷过程中,用径流桶收集水流泥沙样,每 1 min 收集 1 次径流泥沙,每次收集时长为 1 min,1 组试验共收集 10 次径流泥沙。



注:1 为径流桶;2 为土样盒;3 为泡沫板。

图 1 径流冲刷装置示意

Fig. 1 Runoff scour device

1.3 数据处理

冲刷试验结束后将径流桶静置澄清,待泥沙沉淀完全后倒掉上层清液,将剩余泥沙样转移至铁盒内,置于 105℃烘箱中烘 24 h 至恒重后,称取其重量,从而得出每组试验的产沙量,再根据产沙量计算出产沙率。其中产沙率是指单位时间内因侵蚀产生的泥沙量,计算公式为:

$$S = \frac{S_w}{t} \quad (1)$$

式中: S 为产沙率(g/min); S_w 为一定时段内的产沙量(g); t 为冲刷历时(min)。

由于对土壤抗冲性研究的表征指标较多^[26], 本文采用目前研究抗冲性普遍使用的表征指标^[27], 每冲刷 1 g 的烘干土所需的水量用 AS (anti-scourability) 表示, 计算公式为:

$$AS = \frac{ft}{W} \quad (2)$$

式中: AS 为土壤抗冲系数(L/g); f 为冲刷流量(L/min); t 为冲刷时间(min); W 为烘干泥沙质量(g)。

记录试验数据并对其进行分析, 使用 SPSS 22.0 软件数据栏中正交设计功能的选项进行正交试验的设计与数据分析, 利用 Origin 2021 软件进行数据处理与绘图。

2 结果与分析

2.1 不同因素对土壤侵蚀的影响程度

通过对土壤产沙量的极方差分析可知, 各因素的极差大小为流量>坡度>冻融温差>初始含水率>冻融循环次数(表 2)。由表 3 可知, 流量对土壤产沙量有极显著影响($p<0.01$), 坡度与冻融温差对土壤产沙量具有显著影响($p<0.05$)。当流量为 3.0 L/min、坡度为 15°、冻融循环次数为 10 次, 初始含水率为 10%、冻融温差为-1~10 °C 时, 土壤产沙量最大。

表 3 产沙量方差分析

Table 3 Analysis of variance of sediment yield

影响因素	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
冻融循环次数	127 255.766	4	48 959.004	2.054	0.251	
坡度	623 017.177	4	155 754.294	10.057	0.023	*
流量	1 133 158.097	4	283 289.524	18.292	0.008	* *
初始含水率	195 836.016	4	31 813.942	3.161	0.145	
冻融温差	456 347.388	4	114 086.847	7.367	0.039	*

注: * * 表示具有极显著影响($p<0.01$); * 表示具有显著影响($p<0.05$)。下同。

表 4 抗冲性极差分析

Table 4 Analysis of range of anti-scourability

水平	冻融循环次数	坡度	流量	初始含水率	冻融温差
K_1	0.119	0.131	0.124	0.107	0.093
K_2	0.111	0.119	0.122	0.103	0.099
K_3	0.107	0.104	0.117	0.109	0.105
K_4	0.104	0.101	0.100	0.113	0.117
K_5	0.100	0.086	0.088	0.120	0.127
k_1	0.023 8	0.026 2	0.024 8	0.021 4	0.018 6
k_2	0.022 2	0.023 8	0.024 4	0.020 6	0.019 8
k_3	0.021 4	0.020 8	0.023 4	0.021 8	0.021 0
k_4	0.020 8	0.020 2	0.020 1	0.022 7	0.023 4
k_5	0.020 0	0.017 2	0.017 6	0.024 0	0.025 4
R (极差)	0.003 8	0.009 0	0.007 2	0.003 4	0.006 8

通过对土壤抗冲性的极方差分析可知, 各因素的极差大小为坡度>流量>冻融温差>冻融循环次数>初始含水率(表 4)。

由表 5 可知, 流量与坡度对土壤抗冲性有显著影响($p<0.05$)。当流量为 1.0 L/min、坡度为 3°、冻融循环次数为 1 次, 初始含水率为 25%、冻融温差为-25~2 °C 时, 土壤抗冲性最大。

表 2 产沙量极差分析

Table 2 Analysis of range of sediment yield

水平	冻融循环次数	坡度	流量	初始含水率	冻融温差
K_1	4 317.08	3 734.60	3 098.05	4 860.05	5 720.50
K_2	4 496.40	4 202.35	4 477.95	5 296.35	5 132.85
K_3	4 581.70	4 784.00	4 584.65	4 855.20	4 979.00
K_4	4 907.45	5 120.78	5 418.58	4 672.48	4 225.58
K_5	5 023.10	6 034.00	6 296.50	4 191.65	3 817.80
k_1	863.42	746.92	619.61	972.01	1 144.10
k_2	899.28	840.47	895.59	1 059.27	1 026.57
k_3	916.34	956.80	916.93	971.04	995.80
k_4	981.49	1 024.16	1 083.72	934.50	845.12
k_5	1 004.62	1 206.80	1 259.30	838.33	763.56
R (极差)	141.20	459.88	639.69	220.94	380.54

注: $K_1 \sim K_5$ 分别为各因素 1~5 水平的和; $k_1 \sim k_5$ 分别为各因素 1~5 水平的平均值; R 为极差, 表示因素影响程度(R 值大表示影响程度较高, R 值小表示影响程度较低)。下同。

2.2 不同因素对土壤抗冲性的影响

经正交试验分析后, 从图 2 可以看出, 冻融循环次数、坡度及冻融温差与土壤抗冲系数呈线性关系, 而流量与土壤初始含水率呈非线性关系, 且与表 6 中各因素与抗冲系数的函数拟合程度较好($R^2 \geq 0.91$)。由于冻融循环次数、坡度及冻融温差 3 个影响因素与土壤抗冲性呈一次函数关系, 其斜率(k)的物理意义为土壤抗冲系数的变化率(表 6), 故可由 k 的绝对值大小判断 3 种因素对土壤抗冲系数的影响程度为坡度($k=0.000 72$)>冻融温差($k=0.000 43$)>冻融循环次数($k=0.000 40$)。由 k 值的正负可判断, 土壤抗冲系数随土壤冻融循环次数与坡度的增大而减小, 呈负相关, 随冻融温差的增大而增大, 呈正相关。

表 5 抗冲性方差分析

Table 5 Analysis of variance of anti-scourability

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
冻融循环次数	0.000 042 16	4	0.000 010 54	1.519	0.348	
坡度	0.000 239 76	4	0.000 059 94	8.637	0.030	*
流量	0.000 251 36	4	0.000 062 84	9.055	0.028	*
初始含水率	0.000 077 36	4	0.000 019 34	2.787	0.172	
冻融温差	0.000 151 36	4	0.000 037 84	5.452	0.065	

随着冻融循环次数的增加,土壤中水分发生冻胀的次数增多,使得土壤孔隙度逐渐增大,土壤结构变得疏松易侵蚀,从而导致土壤的抗冲系数减小;随着坡度的增大,径流从上端流至下端的速率增大,使得径流能增大,由于径流能与土壤侵蚀速率呈正相关^[25],故在一定的放水流量条件下,坡度越大,土壤侵蚀速率越大,导致土壤的抗冲系数越小。由于本试验对冻融温差变量的设置,随着冻融温差的增大,冻融温度整体越来越低,使得土壤在相同的冻融时间条件下,其冻结程度越来越大,土层的解冻深度变浅,在一定时间内的可侵蚀土量也随之减少,故土壤抗冲系数随着冻融温差的增大而增大。

从流量与土壤抗冲系数的函数关系(图 2)可以看出,土壤抗冲系数随着流量的增大而减小,是因为随着流量的增大,径流能量也越来越大,更容易破坏土壤的结构,使土壤的抗蚀性减弱,从而削弱土壤的抗冲性,加剧土壤侵蚀。流量为 1.0~2.0 L/min 时,土壤抗冲系数变化较为平稳,当流量增加到 2.5 L/min 时,土壤抗冲系数骤然下降,并在流量为 3.0 L/min 时达到 0.017 6 L/g。根据雷诺系数公式判断,可能是由于流量的增大,使得水的流速增加,雷诺数增大,从而使坡面径流从层流逐渐过渡到紊流状态。相比于层流,紊流中存在非常强烈的涡旋和湍流,具有高强度与高能量的特点^[28],使得其对土壤的冲刷强度加大,土壤受侵蚀程度加剧,甚至有局部坍塌的现象发生,最终使得产沙量增加,抗冲系数大幅减小。

从图 2 可以看出,土壤抗冲性随着土壤初始含水率的增加呈先减小后增大的趋势,并在最后土壤初始含水量为 25% 时达到 0.024 L/g。是因为刚开始随着土壤初始含水率的增加,土壤孔隙中的水分增多,经过冻结后水分体积增大,从而使得土壤孔隙度增加,变得疏松且更易侵蚀,导致土壤抗冲性降低。

2.3 不同因素对土壤产沙过程的影响

从图 3 可以看出,随着冻融温差整体温度的降低,土壤侵蚀量也越来越少;随着冻融温差整体温度的升高,土壤侵蚀量也越来越大。在 -1~10 °C 与 -7~8 °C 的冻融温差条件下土壤侵蚀程度较相似,到

-13~6 °C 的温差条件下,相比之前 2 组温差土壤侵蚀量有较为明显的下降;而在 -19~4 °C 与 -25~2 °C 的温差条件下,其土壤侵蚀量相对较低,且侵蚀速率较为平缓。是因为土壤在相同的冻融时间条件下,冻融温差整体偏低的土壤其解冻深度较浅,冻结层上方可侵蚀土壤的量较少,相反冻融温差整体偏高的土壤其解冻深度较深,可侵蚀的土壤量也较多。其次冻融温差整体偏低的土壤,其未完全解冻层密度大,不透水性很强,水分不易下渗,导致径流侵蚀力弱,产沙量小;而冻融温差整体偏高的土壤,其未完全解冻层密度小,孔隙度较大,故径流侵蚀力强,产沙量较大^[23]。

由图 4 可以看出,坡度与土壤产沙量呈正比,随着坡度的增大,每组试验的产沙量也在增加。当坡度为 15° 时,土壤产沙率是最大的,在发生产沙的第 1 min 内产沙率达到 139.8 g/min,而后随着坡度的下降,其产沙速率呈梯度依次降低。是因为随着坡度的增大,水流速度加快,动能增大,导致土壤的抗冲性减弱,从而加剧侵蚀程度^[29-30]。在 10 min 的产沙过程中,各个坡度的产沙率在冲刷起始阶段的变化幅度较大,之后随着时间的推移,各个坡度的产沙率逐渐减小并趋于平稳。

从表 3 可以看出,冻融循环次数相比其他因素对土壤侵蚀的影响较小,最高产沙率控制在 113.57~90.26 g/min。由图 5 可知,随着冻融循环次数的增加,产沙率也在增加。是因为土壤水在冻结过程中,由于变成冰晶体,体积增大使得土体发生膨胀,从而导致土壤颗粒发生位移;同时土壤在融化过程中又存在水分的迁移,增加土粒之间的推动作用,而随着冻融循环次数的增加,对土体的扰动次数也随之增加,使得土壤孔隙度慢慢增大,土壤体积质量降低,变得疏松多孔,导致土壤抗侵蚀能力减弱^[30]。随着冻融循环次数的增加,产沙量的增加幅度是在慢慢减小的。有研究^[23]表明,土壤在发生 5 次冻融循环后,其侵蚀量的增幅逐渐趋于平稳,且在 15 次冻融循环后侵蚀程度不再有明显的增加。从表 4 可以看出,冻融循环次数的 r 值为同组中最小的,说明其相较其他影响因素对土壤侵蚀的影响较小。在冻融循环次数为

7,10 次的 2 组试验中,其产沙率在 3~6 min 时间段内有峰值的出现,分别为 96.73,99.66 g/min。

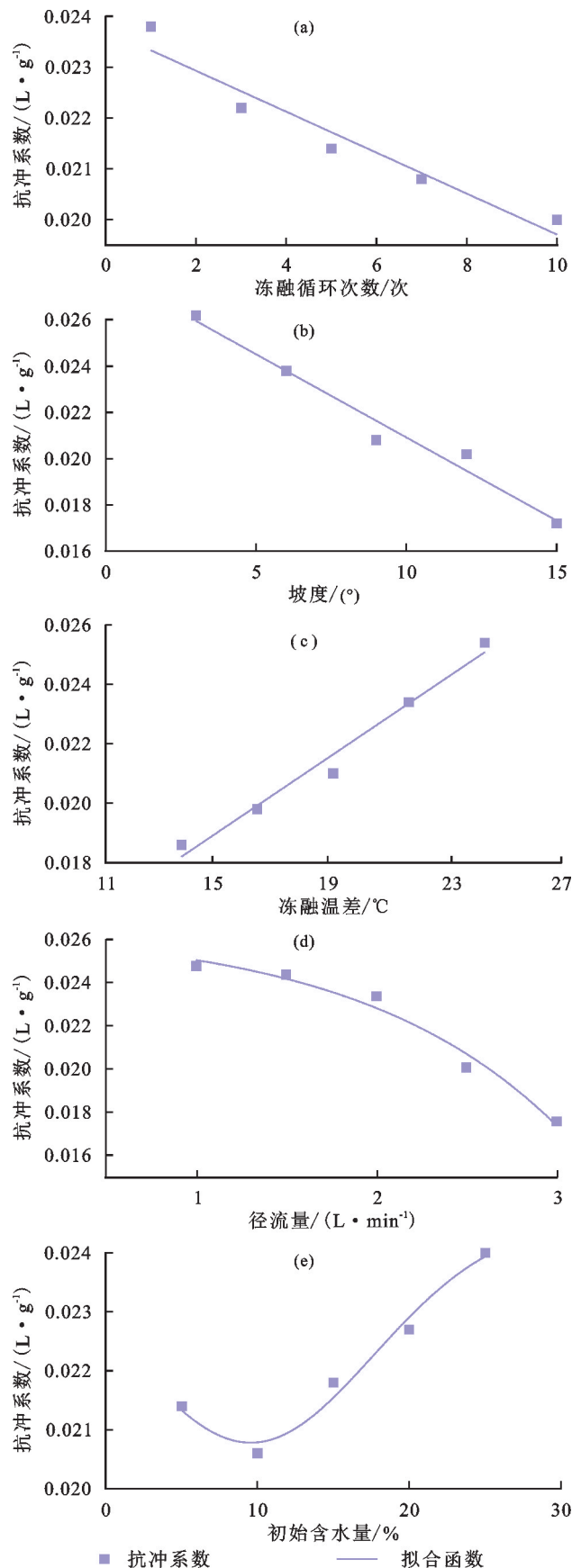


图2 不同因素影响下土壤抗冲系数的变化

Fig. 2 Changes of soil anti-scourability under different factors

表6 不同影响因素与土壤抗冲系数的关系

Table 6 Relationship between different influencing factors and soil anti-scourability

影响因素	关系式	R^2
冻融循环次数	$y = 0.024 - 0.0004x$	0.91
坡度	$y = 0.028 - 0.00072x$	0.96
流量	$y = -0.00063e^{1.12x} + 0.027$	0.96
初始含水率	$y = 0.025 - 0.004e^{-\frac{(x-9.56)^2}{254.03}}$	0.91
冻融温差	$y = 0.013 + 0.00043x$	0.97

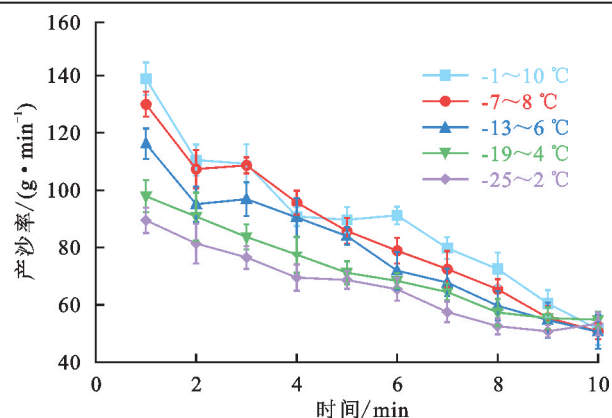


图3 不同冻融温差下产沙率的变化

Fig. 3 Variation of sediment yield under different freeze-thaw temperature differences

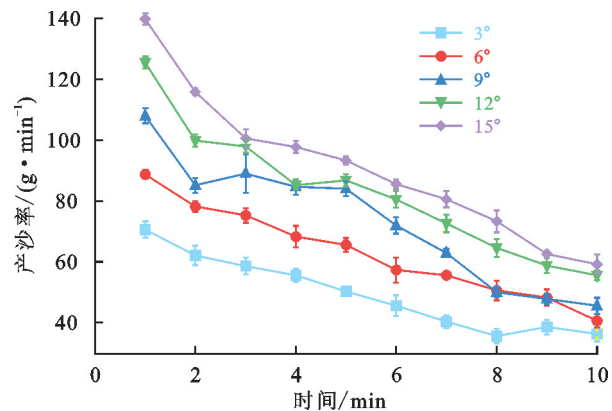


图4 不同坡度下产沙率的变化

Fig. 4 Variation of sediment yield under different slope

由图6可知,产沙率随着土壤初始含水率的增加先增大后减小。在初始土壤含水率为5%~10%,产沙率与含水率呈正比。一般来说,冻结过程中水分迁移的数量和有效迁移时间与土壤中的水分呈正比,土壤在经过冻结后,孔隙内的水分变为冰,体积增大,冰晶体充填土壤颗粒同时并推动土壤颗粒的迁移,使得土壤的物理结构发生改变,而体积分数多的土壤由于水分迁移程度较大,增强这一冻胀作用,使土壤体积质量和孔隙度变化幅度加剧^[31],从而影响土壤侵蚀。当土壤初始含水率为10%~25%时,产沙率与含水率则呈反比,产沙率随着土壤含水率的增大而减小。由于本试验未控制解冻深度这一变量,而是控制冻融

时间,所以出现不同含水率土壤解冻程度不统一的情况,而初始含水率较大的土壤相比初始含水率小的土壤其解冻程度小。已有研究^[32]表明,在水分入渗后的 10 min 内,土壤冻融前初始含水率越大,冻结后土粒间含冰量越多,土壤冻结的深度也越大,这使得土壤中的孔隙比例减少,水力传导度减小,土壤入渗能力降低,从而导致相较冻融前初始含水率低的土壤,含水率高的土壤侵蚀速率慢,产沙量小。

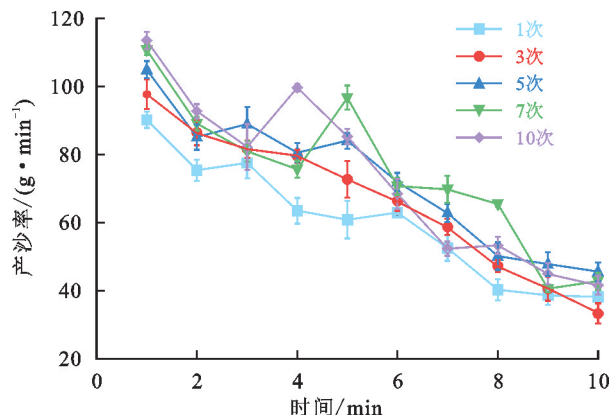


图 5 不同冻融循环次数下产沙率的变化

Fig. 5 Variation of sediment yield under different freeze-thaw cycles

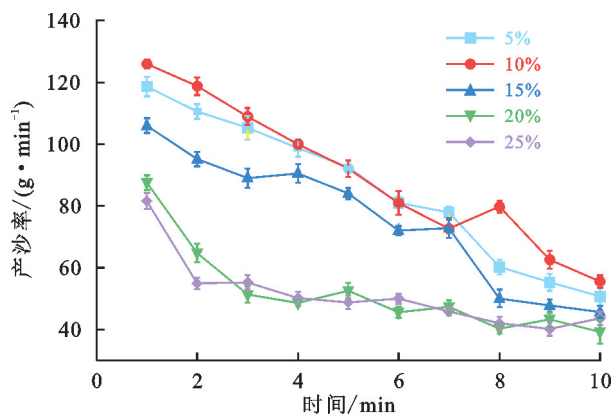


图 6 不同土壤初始含水率条件下产沙率的变化

Fig. 6 Variation of sediment yield under different initial moisture content of soil

由表 4 可知,相比本次试验中的其他影响因素,流量对冻融与水力作用下的土壤侵蚀影响最大($p < 0.01$)。从图 7 可以看出,在冻融与水力作用下,产沙率与流量的大小呈正比,随着流量的增加,土壤产沙率总体呈增大趋势,且产沙量也随之增大。在本组试验中,产沙率最高可以达到 160.2 L/min。在试验开始的前 4 min 时,产沙率都处于一个较高的值。随着时间的继续,当水分下渗到土壤的冻结层时,水分下渗速率降低,侵蚀速率变慢,从而导致产沙率处于一个较低的值^[33]。随着冻结层的不断融化,产沙率最终趋于稳定。

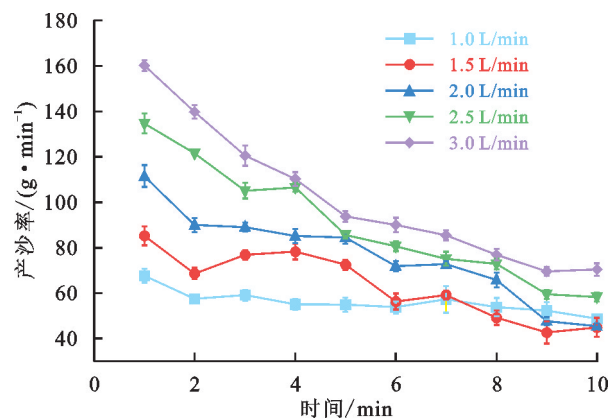


图 7 不同流量下产沙率的变化

Fig. 7 Variation of sediment yield under different flow discharge

3 讨论

土壤侵蚀过程受多种因素影响,在冻融与水力作用下,土壤受到不同冻融程度与水力大小的影响后势必导致土壤侵蚀过程的差异。目前国内外有关这方面的研究主要针对解冻深度、冻融循环次数、土壤含水率等因素对土壤侵蚀过程的影响^[34-36]。如孙宝洋等^[37]、肖俊波等^[23]的研究结果发现,在冻融与水力作用下流量及坡度因素对土壤侵蚀过程的影响程度较大;ZHAO 等^[38]、刘佳等^[31]的研究结果发现,在冻融前后,不同的冻融温差及冻融循环次数对土壤结构产生较大影响。本研究通过选取 5 种影响因素,分析其对土壤产沙量及抗冲性的影响程度,研究结果表明,对土壤产沙量影响程度最大的因素是流量,对土壤抗冲性影响程度最大的因素是坡度,与范昊明等^[24]和肖俊波等^[23]的研究结果一致。而由于在本研究结果中,对土壤产沙量与抗冲性影响程度最大的因素并不一致。造成这种差异的原因可能是因为土壤抗冲性的表达式是每冲刷 1 g 干土所需要的水量,所以相比土壤产沙量来说,流量的变化对土壤抗冲性的影响并不是很大,而坡度这一因素对于土壤抗冲性的影响程度略大于流量。

土壤环境的变化也能够改变土壤结构性性质,从而间接或直接影响土壤的抗冲性^[39-40]。本研究结果表明,土壤抗冲系数随着坡度、流量、冻融循环次数的增大而下降,随着冻融温差的增大而上升,与姜玉喆^[41]、肖俊波等^[23]的研究结果一致。对于土壤初始含水量的增大,土壤抗冲性呈先上升后下降的变化规律。然而,刘佳等^[42]在东北地区的试验结果表明,在冻融与水力作用下,随着土壤初始含水量的增大,土壤可蚀性也随之增大。造成这种差异的原因可能是由于本试验未控制解冻深度,导致在相同冻融时间条件下含水率高的土壤存在解冻深度较浅的现象。由于有冻结层的存在,其可发生侵蚀的土壤相较完全解

冻的土壤要少,故在相同时间下的产沙量减少,抗冲性增大。

对于不同因素对土壤产沙率的影响规律,与本研究不同因素对土壤抗冲性影响规律基本一致。且随着时间的推移,产沙率逐渐减小,与范昊明等^[24]、周丽丽等^[43]的研究结果一致。原因是在一定厚度的土壤中,其导热能力是由上至下逐渐减小的,土壤在经过冻结后,最上层的土壤优先解冻。而后由于下层土壤解冻速率小于上层土壤,固有冻结层的存在,导致水分下渗速率降低,对土壤的侵蚀能力减弱,所以产沙率慢慢减小。研究结果显示,在高冻融循环次数下土壤产沙率在经冲刷前期有峰值出现,可能是由于土壤在经多次冻融循环后,其孔隙度及体积质量相较其他低循环次数的试验组变化较大,冲刷到一定时间后,随着细沟的慢慢加深,坡面发生小崩塌,导致产沙率在某一时间段内骤升。

4 结论

(1)土壤产沙量对各因素敏感程度大小为流量>坡度>冻融温差>土壤含水率>冻融循环次数,其中流量对土壤产沙量有极显著影响($p<0.01$),坡度与冻融温差对土壤产沙量有显著影响($p<0.05$);土壤抗冲系数对各因素敏感程度大小为坡度>流量>冻融温差>冻融循环次数>初始含水率,其中坡度与流量对土壤抗冲系数具有显著影响($p<0.05$),其他因素相较坡度对土壤抗冲性的影响较小。

(2)在一定范围内,冻融循环次数、坡度、流量与土壤抗冲系数呈负相关,冻融温差与土壤抗冲系数呈正相关;当土壤初始含水率为5%~10%时,抗冲系数与土壤初始含水率呈负相关,当土壤初始含水率为10%~25%时,抗冲系数与土壤初始含水率呈正相关。

(3)在一定范围内,冻融循环次数越多,土壤的物理性质受改变程度越大,更易受到侵蚀。在相同的冻融时间条件下,随着流量、坡度、冻融循环次数的增大,土壤产沙量整体呈增大趋势;随着冻融温差整体温度的下降,产沙量整体呈减小趋势;而随着土壤含水率的增加,土壤产沙量呈现先增大后减小的趋势。在对高冻融循环次数土壤进行径流冲刷时,土体有崩塌现象发生,导致土壤产沙率骤增。

参考文献:

- [1] 唐克丽,席道勤,孙清芳,等.杏子河流域的土壤侵蚀方式及其分布规律[J].水土保持通报,1984(5):10-19.
TANG K L, XI D Q, SUN Q F, et al. Soil erosion patterns and distribution rules in Xingzihe River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984(5):10-19.
- [2] FAN H M, ZHANG R F, ZHOU L L, et al. Impact of climate change on freeze-thaw function and freeze-thaw erosion in black soil region of Northeast China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(6):48-53.
- [3] LIU X D, CHENG Z G, YAN L B, et al. Elevation dependency of recent and future minimum surface air temperature trends in the Tibetan Plateau and its surroundings[J]. Global and Planetary Change, 2009, 68(3):164-174.
- [4] BAN Y Y, LEI T W, LIU Z Q, et al. Comparative study of erosion processes of thawed and non-frozen soil by concentrated meltwater flow[J]. Catena, 2017, 148: 153-159.
- [5] 赵娅君,郑粉莉,安小兵,等.典型黑土区坡耕地融雪、风力、降雨复合侵蚀效应[J].应用生态学报,2023,34(9): 2421-2428.
ZHAO Y J, ZHENG F L, AN X B, et al. Compound erosion effect of snowmelt, wind, and rainfall on sloping farmlands of Chinese typical Mollisol Region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(9): 2421-2428.
- [6] 景国臣.冻融侵蚀的类型及其特征研究[J].中国水土保持, 2003(10):17-18.
JING G C. Study on types of freeze-thaw erosion and its characteristics[J]. Soil and Water Conservation in China, 2003(10):17-18.
- [7] GABET E J, BURBANK D W, PRATT-SITULA B, et al. Modern erosion rates in the High Himalayas of Nepal[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 267 (3/4):482-494.
- [8] 范昊明,蔡强国.冻融侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学, 2003, 1(4):50-55.
FAN H M, CAI Q G. Review of research progress in freeze-thaw erosion [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(4):50-55.
- [9] 王飞,范昊明,郭成久,等.我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J].生态环境, 2008, 17(1):173-177.
WANG F, FAN H M, GUO C J, et al. Comparison and analysis of climate environmental variation in two main freeze-thaw erosion regions in China [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1):173-177.
- [10] RAGETTLI S, PELLICCIOTTI F, IMMERZEEL W W, et al. Unraveling the hydrology of a Himalayan Catchment through integration of high resolution *in situ* data and remote sensing with an advanced simulation model [J]. Advances in Water Resources, 2015, 78:94-111.
- [11] HENRY H A L. Soil freeze - thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(5):977-986.
- [12] WEI X, HUANG C H, WEI N, et al. The impact of freeze-thaw cycles and soil moisture content at freezing

- on runoff and soil loss[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(5): 515-523.
- [13] WANG L, ZUO X F, ZHENG F L, et al. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol Region[J]. *Catena*, 2020, 193: e104615.
- [14] 和继军, 蔡强国, 王学强. 北方土石山区坡耕地水土保持措施的空间有效配置[J]. *地理研究*, 2010, 29(6): 1017-1026.
- HE J J, CAI Q G, WANG X Q. Study on optimized patterns of soil and water conservation measures on sloping fields in earth-rocky mountainous area of Northern China[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(6): 1017-1026.
- [15] 黄钰. 北京海坨山冬季降雪云系垂直结构的综合观测和个例数值模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- HUANG Y. Comprehensive observations and case numerical simulation studies on vertical structure of winter snow clouds in Haituo Mountain in Beijing[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019.
- [16] 辛诚澍. 典型北方土石山区土壤种子库特征及植被恢复应用潜力[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
- XIN C S. Study on characteristics of soil seed bank and its vegetation restoration potential in typical rocky mountainous area of North China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [17] 张明礼, 杨浩, 邹军, 等. 北方土石山区土壤侵蚀对土壤质量的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 218-221.
- ZHANG M L, YANG H, ZOU J, et al. Effects of soil erosion on soil quality in the rocky mountain areas of Northern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 218-221.
- [18] 赵思远, 苏辉东, 贾仰文, 等. 北方土石山区典型坡面优先流特征研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 9-15.
- ZHAO S Y, SU H D, JIA Y W, et al. Characteristics of preferential flow on typical slope in northern rocky mountain area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 9-15.
- [19] 李子君, 刘家圆, 王海军. 北方土石山区坡面水土流失特征研究[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(1): 1-9.
- LI Z J, LIU J Y, WANG H J. Study on the characteristics of soil and water loss on the slopes in northern rocky mountain area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1): 1-9.
- [20] 薛鸥, 魏天兴. 鹭峰国家森林公园低效人工林林下植物种间关联[J]. *植物研究*, 2016, 36(1): 34-42.
- XUE O, WEI T X. Interspecific association among understory species of the low-efficiency plantation in the Jiufeng national forest park[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2016, 36(1): 34-42.
- [21] 安娟, 王富, 吴元芝, 等. 北方土石山区土地利用方式对褐土团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 10-16.
- AN J, WANG F, WU Y Z, et al. Effect of land use types on aggregate stability for cinnamon soil in earth-rocky mountainous area of Northern China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 10-16.
- [22] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5): 977-986.
- [23] 肖俊波, 孙宝洋, 李占斌, 等. 冻融条件下土壤抗冲性的变化特征[J]. *中国水土保持*, 2017(1): 37-40.
- XIAO J B, SUN B Y, LI Z B, et al. Variation characteristics of aeolian sandy soil anti-scourability under freezing and thawing conditions[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2017(1): 37-40.
- [24] 范昊明, 郭萍, 武敏, 等. 春季解冻期白浆土融雪侵蚀模拟研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(6): 130-133.
- FAN H M, GUO P, WU M, et al. Simulated snowmelt runoff on lessive in spring thawing period[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(6): 130-133.
- [25] WANG T, LI P, LIU Y F, et al. Experimental investigation of freeze-thaw meltwater compound erosion and runoff energy consumption on loessal slopes[J]. *Catena*, 2020, 185: e104310.
- [26] 马金龙, 王兵. 1962—2022 年土壤抗冲性研究进展[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(17): 19-28.
- MA J L, WANG B. Research progress of soil anti-scourability from 1962 to 2022[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(17): 19-28.
- [27] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 105-112.
- LI Q, LIU G B, XU M X, et al. Effect of seasonal freeze-thaw on soil anti-scourability and its related physical property in hilly Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(17): 105-112.
- [28] LAUFER J. New trends in experimental turbulence research[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1975, 7: 307-326.
- [29] 张龙齐, 贾国栋, 吕相融, 等. 控制坡度条件下黄土高原不同质地坡面土壤侵蚀研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6): 11-24.
- ZHANG L Q, JIA G D, LYU X R, et al. Research on slope soil erosion of different textures on the Loess Plateau under slope control[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(6): 11-24.
- [30] ZHANG S L, WANG X R, XIAO Z L, et al. Quantitative studies of gully slope erosion and soil physiochemical properties during freeze-thaw cycling in a Mollisol Region[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: e136191.

- [31] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J].水土保持学报,2009,23(6):186-189.
LIU J, FAN H M, ZHOU L L, et al. Study on effects of freeze-thaw cycle on bulk density and porosity of black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 186-189.
- [32] 郑秀清,樊贵盛.土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J].农业工程学报,2000,16(6):52-55.
ZHENG X Q, FAN G S. Influence of moisture content on infiltration characteristics in seasonal frozen and thawed soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(6): 52-55.
- [33] WANG W, LI Z B, YANG R, et al. Experimental study of freeze-thaw/water compound erosion and hydraulic conditions as affected by thawed depth on loessal slope[J]. Frontiers in Environmental Science, 2020, 8: e609594.
- [34] WEI X, HUANG C, WEI N, et al. The impact of freeze-thaw cycles and soil moisture content at freezing on runoff and soil loss[J/OL]. Land Degradation and Development, 2018. DOI: 10.1002/ldr.3243.
- [35] 赵娅君,郑粉莉,毋冰龙,等.冻融作用对黑土坡面融雪、风力和降雨侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2024,38(4):63-71.
ZHAO Y J, ZHENG F L, WU B L, et al. Effects of Freeze-thaw Action on Snowmelt, Wind and Rainfall Erosion in Chinese Typical Mollisol Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 63-71.
- [36] 魏霞,李勋贵, HUANG C H. 交替冻融对坡面产流产沙的影响[J].农业工程学报,2015,31(13):157-163.
WEI X, LI X G, HUANG C H. Impacts of freeze-thaw cycles on runoff and sediment yield of slope land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 157-163.
- [37] 孙宝洋,吴志广,李占斌,等.冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J].农业工程学报,2020,36(11):57-65.
SUN B Y, WU Z G, LI Z B, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 57-65.
- [38] ZHAO Y S, WANG E H, CRUSE R M, et al. Characterization of seasonal freeze-thaw and potential impacts on soil erosion in Northeast China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(3): 567-571.
- [39] BURYLO M, HUDEK C, REY F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France)[J]. Catena, 2011, 84(1/2): 70-78.
- [40] 兰航宇,段文标,陈立新,等.林型和微立地类型及其土壤性质对土壤抗侵蚀能力的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):108-114.
LAN H Y, DUAN W B, CHEN L X, et al. Effects of forest type, microsite type and soil properties on soil erosion resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 108-114.
- [41] 姜玉喆.冻融条件下黑土孔隙特征对土壤抗冲性影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.
JIANG Y Z. Study on the effect of pore characteristics of black soil on soil scour resistance under freezing-thawing conditions[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [42] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J].水土保持学报,2009,23(4):64-67.
LIU J, FAN H M, ZHOU L L, et al. Study on effects of rainfall in the spring thaw period on black soil slope erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 64-67.
- [43] 周丽丽,王铁良,范昊明,等.未完全解冻层对黑土坡面降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):1-4.
ZHOU L L, WANG T L, FAN H M, et al. Effects of incompletely thawed layer on black soil slope rainfall erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 1-4.
- (上接第91页)
- [28] 樊晶晶,刘纯,穆征,等.不同基流分割方法在秦岭山区—黄土高原过渡带的对比应用及其演化规律研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(3):1-10.
FAN J J, LIU C, MU Z, et al. Comparative application of different base flow segmentation methods in the transition zone between Qinling Mountains and Loess Plateau and its evolution law [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 1-10.
- [29] LI Z, LIN X Q, XIANG W, et al. Stable isotope tracing of headwater sources in a river on China's Loess Plateau [J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(13): 2150-2159.
- [30] ZHANG S L, YANG D W, YANG Y T, et al. Excessive afforestation and soil drying on China's Loess Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(3): 923-935.